

Vít KRIVÝ¹

VLIV KOROZE NA SPOLEHLIVOST OCELOVÝCH PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍ

Abstract

This paper deals with the application of the probabilistic SBRA method to the reliability assessment of steel bar structures, whereas main attention is paid to the evaluation of possible corrosion effects. Advances in computer technology and informatics create assumptions for apposite reliability evaluation of new designed as well as existing structures exposed to corrosion effects. Utilization of probabilistic simulation-based methods can offer to designers quite easy, but simultaneously efficient and applicable tool for analysis of steel structures exposed to corrosion effects. It is so possible to design new structures with respect to the required durability using this method or to evaluate the residual service life of existing structures.

1 ÚVOD

Koroze (tj. znehodnocování materiálu způsobené chemickými nebo fyzikálně chemickými reakcemi mezi materiálem a prostředím, které ho obklopuje) je jedním z nejvýznamnějších degradačních činitelů ovlivňujících spolehlivost a tím také ekonomiku ocelových konstrukcí. Úkolem projektanta ocelových konstrukcí je navrhnout vhodnou protikorozi ochranu (např. nátěr, pokovování, nerezavějící či patinující ocel apod.). Optimální ochrana ocelové konstrukce je taková, kdy součet nákladů na výrobu, montáž, protikorozi ochranu, údržbu a demontáž ocelové konstrukce je minimální. Aby mohl projektant provést optimalizaci výše uvedených nákladů vedoucí k ekonomickému návrhu ocelové konstrukce, musí mít k dispozici dostatečně výkonný nástroj, umožňující vyhodnocení spolehlivosti (tj. bezpečnosti, použitelnosti a trvanlivosti) konstrukce vystavené možným účinkům koroze.

Kromě návrhu nových konstrukcí jsou projektanti-statici velmi často vystaveni problematice hodnocení spolehlivosti stávajících ocelových konstrukcí, u kterých již začal a do určité míry postoupil proces degradace základního materiálu korozi. Velmi často se jedná o objekty industriálního charakteru vystavené přímým negativním účinkům venkovního a někdy i vnitřního prostředí (v důsledku průmyslové výroby často velmi agresivního), jako jsou například potrubní a dopravníkové mosty, elektroodlučovače elektráren, skládkové stroje, zásobníky sypkých a tekutých materiálů, obslužné lávky apod. Koroze samozřejmě ovlivňuje také spolehlivost neindustriálních objektů s ocelovou nosnou konstrukcí. Kromě agresivního prostředí jsou častou příčinou vzniku koroze nevhodně navržené detaily (dochází např. ke kumulaci nečistot a vlhkosti) nebo zanedbaná údržba konstrukce (pravidelné čištění problematických částí konstrukce, oprava či obnova protikorozi ochrany), viz obrázek 1.

Koroze se může projevovat velmi rozdílně, a to nejen podle povahy prostředí, ale také podle vlastností kovových materiálů a různých podmínek. Jednotlivá korozi napadení lze obecně rozdělit na dva druhy, tj. na korozi rovnoměrnou a nerovnoměrnou [1]. Rovnoměrná koroze se projevuje při vizuálním pozorování jako napadení po celém povrchu kovu s přibližně stejným úbytkem materiálu. Nerovnoměrná koroze je napadení, které probíhá nerovnoměrně nejen na povrchu kovů, ale i uvnitř. Tato koroze je vzhledem k náročnější identifikaci a vyhodnocení více nebezpečná. Nerovnoměrná napadení ocelových součástí lze rozdělit na makroskopická (především důlková, bodová a šterbinová koroze) a mikroskopická (mezikrystalická a transkrystalická koroze), podrobnosti viz [1]. V další části příspěvku bude pozornost věnována především vlivu rovnoměrné koroze, popřípadě

¹ Ing. Vít Krivý, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 363, e-mail: vit.krivy@vsb.cz.

nerovnoměrné makroskopické koroze, u které lze s dostatečnou přesností a výstižností stanovit oslabení základního materiálu od účinků koroze.



Obr. 1: Vlevo nahoře: nevhodný detail (dochází ke kumulaci sypkého materiálu); Vpravo nahoře: nevhodný detail (dochází k zadržování vody); Vlevo dole: zanedbaná údržba uložení sloupů (znečištěný základ); Vpravo dole: zanedbaná obnova protikorozní ochrany (důlková koroze).

2 POUŽITÝ MODEL PRO STANOVENÍ DEGRADACE MATERIÁLŮ

Za základní parametr spolehlivosti konstrukce se považuje rezerva spolehlivosti $G(t)$, která je v inženýrských postupech teorie spolehlivosti popsána rovnicí:

$$G(t) = R(t) - E(t) . \quad (1)$$

Náhodně proměnné hodnoty odolnosti konstrukce $R(t)$ a odezvy konstrukce na zatížení $E(t)$, jakož i výsledná rezerva spolehlivosti $G(t)$ jsou obecně hodnoty závislé na čase. Odolnost prvků ocelové prutové konstrukce se s časem mění v důsledku působení různých degradačních činitelů, především pak koroze. Podobně se s časem mění i odezva zatížení, ať již v důsledku změny samotného zatížení, tak také změnou výpočetního modelu konstrukce pro stanovení odezvy konstrukce na zatížení právě následkem degradace materiálu jednotlivých prvků konstrukce.

Pro stanovení časově závislých průřezových charakteristik jednotlivých prvků konstrukce je zapotřebí mít k dispozici model pro výpočet korozivního úbytku materiálu. V další části bude uvažován model korozivního úbytku podle Frangopola [2] a [3]:

$$d_{corr} = A_0 \cdot t^{A1} , \quad (2)$$

kde t je čas v letech, A_0 a A_t jsou časově nezávislé koeficienty. Výše uvedená závislost byla stanovena matematickou aproximací hodnot získaných měřením korozivních úbytků pásnic ohýbaných nosníků v mostní roštové soustavě (příslušné hodnoty koeficientů A_0 a A_t pro jednotlivé mostní prvky jsou uvedeny v [3]).

Tabulka 1: Popis typických prostředí pro odhad stupně korozní agresivity podle [6].

Stupeň korozní agresivity	Korozní agresivita	Typická prostředí (příklady)	
		Vnitřní prostředí	Vnější prostředí
C1	velmi nízká	Vytápěné prostory s nízkou relativní vlhkostí a zanedbatelným znečištěním, např. kanceláře, školy, muzea.	Suché nebo studené klimatické oblasti s velmi nízkým znečištěním a dobou ovlhčení, např. některé pouště, střední Antarktida.
C2	nízká	Nevytápěné prostory s proměnlivou teplotou a relativní vlhkostí. Nízká četnost výskytu kondenzace a nízké znečištění, např. sklady, sportovní haly.	Mírná klimatická oblast, atmosféry s nízkým znečištěním ($\text{SO}_2 < 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), např. venkovské oblasti, malá města. Suché nebo studené klimatické oblasti s nízkým znečištěním, např. pouště, subarktické oblasti.
C3	střední	Prostory se střední četností výskytu kondenzace a se středním znečištěním z výrobních procesů, např. výroby potravin, prádelny, pivovary.	Mírná klimatická oblast se středním znečištěním (SO_2 : $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ až $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) nebo malým vlivem chloridů, např. městské oblasti, přímořské oblasti s nízkým spadem chloridů. Tropické klimatické oblasti s nízkým znečištěním.
C4	vysoká	Prostory s vysokou četností výskytu kondenzací a vysokým znečištěním z výrobních procesů, např. průmyslové výrobní provozy, plavecké bazény.	Mírná klimatická oblast s vysokým znečištěním (SO_2 : $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ až $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) nebo značným vlivem chloridů, např. znečištěné městské oblasti, průmyslové oblasti, přímořské oblasti mimo zóny s postřikem slanou vodou, silný vliv solí rozmrazovacích prostředků. Tropické klimatické oblasti se středním znečištěním.
C5	velmi vysoká	Prostory s téměř trvalým výskytem kondenzací a/nebo s vysokým znečištěním z výrobních procesů, např. důlní prostory, podzemní výrobní prostory, neprovětrávané přístřešky v tropických oblastech.	Mírná klimatická oblast s velmi vysokým znečištěním (SO_2 : $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ až $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a/nebo silným vlivem chloridů, např. průmyslové oblasti, přímořské oblasti, zóny s postřikem slanou vodou. Tropické klimatické oblasti s silným znečištěním a/nebo se silným vlivem chloridů.

Kromě výstižné aproximace naměřených hodnot korozivních úbytků lze výše uvedený vztah použít také k počátečnímu odhadu závislosti korozivního napadení na čase. Nejsou-li k dispozici dostatečné údaje z předchozích měření, lze alternativně využít údaje z odborné literatury [1] či přísluš-

ných norem. Pro případ atmosférické koroze lze potřebné údaje najít v normách [4], [5] a [6]. Stupeň korozní agresivity atmosfér (C1 až C5) lze určit na základě klasifikace úrovní znečištění [4] a [7] nebo na základě změřené korozní rychlosti standardních vzorků [4] a [8]. Pro odhad stupně korozní agresivity lze využít také tabulku 1. Směrné hodnoty korozních rychlostí uhlíkové oceli v atmosférách s různým stupněm korozní agresivity jsou uvedeny v tabulce 2 (korozní rychlost uhlíkové oceli není během prvních 10 let konstantní).

Tabulka 2: Směrné hodnoty korozních rychlostí uhlíkové oceli v atmosférách s různým stupněm korozní agresivity podle [4], [5]

Korozní rychlost r_{corr} [μm /rok] pro první rok expozice pro následující stupně korozní agresivity				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{corr} \leq 1,3$	$1,3 < r_{corr} \leq 25$	$25 < r_{corr} \leq 50$	$50 < r_{corr} \leq 80$	$80 < r_{corr} \leq 200$
Průměrná korozní rychlost r_{av} [μm /rok] pro prvních 10 let expozice pro následující stupně korozní agresivity				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{av} \leq 0,5$	$0,5 < r_{av} \leq 5$	$5 < r_{av} \leq 12$	$12 < r_{av} \leq 30$	$30 < r_{av} \leq 100$
Ustálená korozní rychlost r_{lin} [μm /rok] pro následující stupně korozní agresivity				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{lin} \leq 0,1$	$0,1 < r_{lin} \leq 1,5$	$1,5 < r_{lin} \leq 6$	$6 < r_{lin} \leq 20$	$20 < r_{lin} \leq 90$

Pozn.: Hodnoty uvedené v tabulce 2 odpovídají korozivnímu úbytku na jednom exponovaném povrchu materiálu. V programu MCD 1.2 (viz kapitola 3) se zadávají parametry pro celkový korozivní úbytek pásnice či stojiny, což odpovídá výsledkům měření oslabené tloušťky dané části prvku. Například pro stupeň korozní agresivity 4 lze očekávat průměrný roční úbytek materiálu pásnice a stojiny posuzovaného „I“ profilu pro prvních 10 let expozice v rozmezí 24 až 60 μm . Předpokládaný rozptyl hodnot lze jednoduše modelovat vhodným rozdělením pravděpodobnosti.

3 SOFTWARE MCD 1.2

V následující kapitole je pozornost zaměřena na popis softwarového produktu MCD 1.2, který byl vytvořen jako program sloužící k pravděpodobnostnímu posudku spolehlivosti rovinných ocelových prutových konstrukcí vystavených účinkům koroze. Software je odvozen od produktu MCD 1.0, tj. základní program pro posudek spolehlivosti ocelových prutových konstrukcí bez účinků koroze, podrobnosti viz [9]. V produktu MCD 1.2 lze každému prutu posuzované konstrukce zadávat tři vstupní údaje týkající se vlivu koroze oceli na posudek spolehlivosti konstrukce (zadávací formulář je znázorněn na obrázku 2).

Prvním vstupním údajem jsou koeficienty A_0 a A_1 , které jsou součástí vztahu /2/ pro výpočet korozivního úbytku základního materiálu posuzovaného průřezu. Oba koeficienty je možno zadat jako konstantní hodnoty nebo jako náhodně proměnné veličiny. Jak již bylo uvedeno výše, hodnoty koeficientů A_0 a A_1 lze výstižně stanovit na základě výsledků měření posuzované konstrukce vystavené účinkům koroze nebo odhadnout v souladu s odbornou literaturou či předchozími zkušenostmi s provozem obdobných konstrukcí. Zavedením koeficientů A_0 a A_1 (popř. společně s dalšími vstupními údaji, viz níže) do analýzy konstrukce lze provést vyhodnocení spolehlivosti v libovolném časovém úseku její životnosti.

Druhým významným vstupním údajem je počáteční oslabení jednotlivých průřezů koroze. Charakteristika se zadává ve formě počátečního oslabení tloušťky pásnic a stojiny, což odpovídá výsledkům měření, která jsou provedena na posuzovaných konstrukcích vystavených účinkům koroze (kontrola ultrazvukem, ruční měření posuvným měřidlem atd.). Počáteční oslabení je opět možno zadat jako konstantní hodnotu nebo náhodně proměnnou veličinu. Program MCD 1.2 tak umožňuje, kromě predikce životnosti nově navrhovaných konstrukcí, také vyhodnocení únosnosti, použitelnosti a trvanlivosti stávajících konstrukcí, vystavených účinkům koroze.

Třetím vstupním údajem, který může uživatel zadat, je kvalita protikorozní ochrany. Uživatel programu přiděluje jednotlivým prutům konstrukce čas v letech, během kterého se předpokládá, že daný prvek konstrukce je chráněn a není tak vystaven nepříznivým účinkům koroze. Charakteristiku je opět možno zadat jako konstantní hodnotu nebo náhodně proměnnou veličinu.

Obr. 2: Program MCD 1.2 - formulář pro zadání dat o korozi.

Zadání konstrukce včetně zatížení, materiálových charakteristik a imperfekcí je totožné jako u programu MCD 1.0 [9]. Pokud si uživatel programu přeje výpočet se započítáním možných účinků koroze, je před vlastní analýzou metodou Monte-Carlo vyzván, aby zadal čas v letech, ve kterém má být proveden posudek spolehlivosti konstrukce. Posudek spolehlivosti tak lze provést v libovolném období předpokládané životnosti konstrukce. Obdobně jako u programu MCD 1.0 slouží k vyhodnocení spolehlivosti křivky pravděpodobnosti poruchy, které jsou programem automaticky vygenerovány pro posudek únosnosti i použitelnosti. Získané hodnoty pravděpodobností poruchy je rovněž možno uložit do textového souboru.

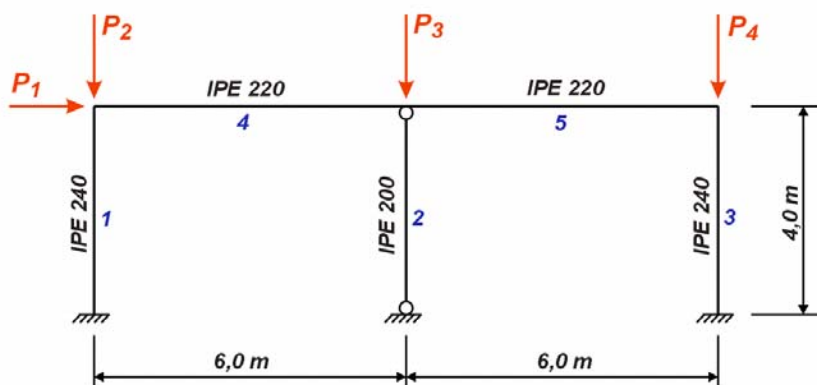
Je vhodné upozornit na skutečnost, že program MCD 1.2 není v žádném případě univerzálním statickým softwarem pro pravděpodobnostní analýzu ocelových konstrukcí vystavených účinkům koroze. Hlavním cílem a motivem bylo vytvořit uživatelsky příjemnou aplikaci, která by naznačila možnosti a případný směr dalšího vývoje v oblasti posuzování spolehlivosti ocelových konstrukcí (stávajících či nově navrhovaných) s využitím pravděpodobnostních simulačních metod. Produkt MCD 1.2 tak dostatečně zřetelně ukazuje, že pravděpodobností posudek ocelových konstrukcí může

být principiálně jednoduchý, přehledný a transparentní, což je jednou ze základních podmínek pro budoucí širší uplatnění pravděpodobnostních metod v projekční praxi.

4 MODELOVÝ PŘÍKLAD

4.1 Zadání

Využití programu MCD 1.2 pro posudek spolehlivosti ocelových prutových konstrukcí vystavených účinkům koroze je v následující kapitole naznačeno na posudku spolehlivosti portálového rámu s centrálním kyvným sloupem, viz obrázek 3. Předpokládá se, že materiálové vlastnosti oceli (mez kluzu), lokální a globální imperfekce prutové soustavy a jednotlivá zatížení jsou vzájemně statisticky nezávislé veličiny. Délka prutů a průřezové charakteristiky korozi neoslabených průřezů jsou v uvedeném příspěvku uvažovány jako konstantní hodnoty. Dále se předpokládá, že konstrukce je zajištěna proti vybočení z roviny rámu.



Obr. 3: Schéma geometrie a zatížení rámu.

Jednotlivá zatížení působící na konstrukci jsou uvažována jako vzájemně nezávislá a jsou vyjádřena, v souladu s postupy metody SBRA, křivkami trvání zatížení a odpovídajícími histogramy [10]. Zatížení jsou blíže specifikována v tabulce 3. Histogramy reprezentující jednotlivá zatížení jsou převzaty z databáze uvedené v [11]. Sloupy a příčle rámu jsou navrženy z válcovaných průřezů IPE, viz obrázek 3. Ocel je třídy S235. Hodnota meze kluzu oceli f_y je reprezentována návrhovým histogramem pro ocel S235, viz tabulka 4.

Tabulka 3: Zatížení konstrukce.

Zatížení		Maximální hodnota	Použitý histogram
Symbol	Popis		
P_1	Zatížení větrem	38 kN	Wind1.dis
P_2, P_4	Zatížení stálé	200 kN	Dead1.dis
	Zatížení nahodilé krátkodobé	100 kN	Short2.dis
	Zatížení nahodilé dlouhodobé	50 kN	Long1.dis
P_3	Zatížení stálé	400 kN	Dead1.dis
	Zatížení nahodilé krátkodobé	200 kN	Short2.dis
	Zatížení nahodilé dlouhodobé	100 kN	Long1.dis

Tabulka 4: Návrhové histogramy meze kluzu oceli [12].

Třída	Sortiment	Průměr	SModch	$f_{y,k}$	Min	Max
S235	profily (IPE, UPE, L, T)	292	15,9	266	244,3	339,7
	plochá ocel, hrubé profily		22,2	256	225,4	358,6
	plech		29,2	244	204,4	379,6
S355	profily (IPE, UPE, L, T)	398	23,9	359	326,3	469,7
	plochá ocel, hrubé profily		28,7	351	311,9	484,1
	plech		33,8	343	296,6	499,4

Má-li být konstrukce posouzena pouze z pevnostního hlediska v souladu s postupem podle Dutheila (bez potřeby vyčíslení vzpěrných délek a stanovení součinitelů vzpěrnosti), je nutné konstrukci posoudit podle teorie II. řádu, přičemž již od počátku musí být konstrukce sledována se všemi nedokonalostmi – imperfekcemi. V souladu s doporučeními normy [13] jsou všechny typy imperfekcí (geometrické, strukturální a konstrukční) zahrnuty do jedné náhradní geometrické imperfekce. Tyto ekvivalentní geometrické imperfekce lze rozdělit do dvou skupin - na globální ekvivalentní geometrické imperfekce prutové soustavy a lokální ekvivalentní geometrické imperfekce prutů. Ekvivalentní geometrické imperfekce soustavy ve formě počátečního natočení rámu ϕ je v řešeném příkladu zavedena pomocí useknutého histogramu s normálním rozdělením $N(\mu = 0, \sigma = 1 / 735)$ a hraničními hodnotami $\phi_{Max} = \pm 1 / 245$ [rad]. Hodnota ϕ_{Max} je stanovena pro posuzovaný rám jako návrhová hodnota spočtená v souladu s doporučením normy [13]. Ekvivalentní geometrické imperfekce prutů jsou podle normy [13] uvažovány počátečním prohnutím prutů s hodnotou maximální výchylky e_0 uprostřed prutu. Pro jednotlivé pruty rámu jsou hodnoty počátečního průhybu e_0 reprezentovány useknutými histogramy normálního rozdělení $N(\mu = 0, \sigma = L / 900)$ s hraničními hodnotami $e_{0,Max} = \pm L / 300$ [m], kde L je délka prutu. Algoritmus pro posudek konstrukce podle teorie II. řádu se zohledněním vlivu imperfekcí je součástí programu MCD 1.2.

Zadaná rámová konstrukce je řešena ve 2 variantách. V části 4.2 je proveden a vyhodnocen posudek únosnosti a použitelnosti konstrukce bez uvažování nepříznivých účinků koroze. Vyhodnocení spolehlivosti konstrukce vystavené účinkům koroze, včetně predikce dalšího spolehlivého fungování konstrukce, je naznačeno v části 4.3. Analýza je provedena na „typickém“ příkladě degradace nosné konstrukce, kdy dochází ke korozivnímu napadení spodní části nosných sloupů vystavených nepříznivým vlivům, jako jsou zvýšený kontakt s vlhkostí, kumulace sypkých materiálů či zvýšená koncentrace solí. Pro případ rovinné rámové konstrukce znázorněné na obrázku 3 se jedná o krajní sloupy 1 a 3.

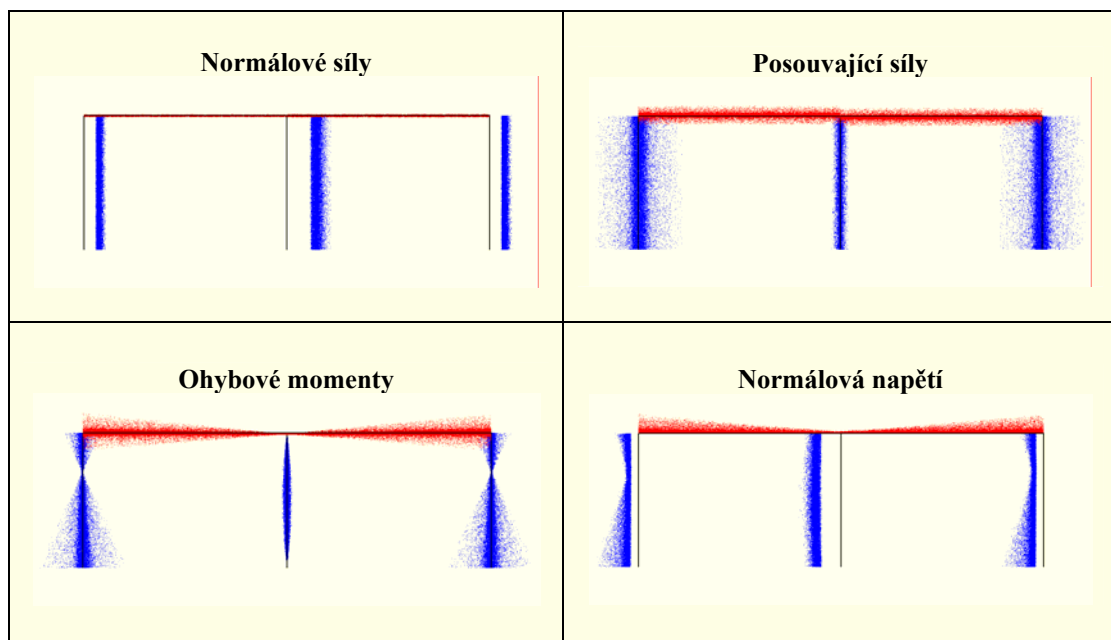
4.2 Posudek spolehlivosti bez uvážení vlivu koroze

Tradiční posudek rámových konstrukcí podle současných platných norem [13], [14] založený na lineární analýze a určení vzpěrných délek a součinitelů vzpěrnosti může být v mnoha případech značně nepřesný. Jako příklad lze uvést konstrukce portálových rámu, u kterých je kvůli zvýšení únosnosti a snížení vodorovného průhybu přičli umístěn prostřední kyvný sloup, viz řešená konstrukce znázorněná na obrázku 3 nebo práce [15]. Například podle normy [14] by neměl prostřední sloup přenášet téměř žádné zatížení kvůli vysoké hodnotě vzpěrné délky, pokud je rám klasifikován jako posuvný (sway frame). Výstižnější analýza podle teorie II. řádu však ukazuje na skutečnost, že prostřední kyvný sloup se významně podílí na přenosu svislých účinků zatížení [16]. Zároveň je potřeba poukázat na skutečnost, že geometricky nelineární analýza „běžných“ prutových konstrukcí již nepředstavuje pro výpočetní techniku významný časový a kapacitní problém.

Geometricky nelineární výpočetní model rovinných prutových konstrukcí je rovněž součástí programu MCD 1.2. Při analýze konstrukce programem MCD 1.2 je v každém simulačním kroku vygenerován nový vektor náhodně proměnných veličin (zatížení, mez kluzu oceli, imperfekce). Tento

postup umožňuje snadné provedení globální analýzy podle teorie II. řádu včetně přímého započítání vlivu ekvivalentních geometrických imperfekcí na odezvu konstrukce. Je-li analýza konstrukce provedena podle teorie II. řádu se započtením vlivu lokálních a globálních imperfekcí, pak je možno provést posudek únosnosti jednotlivých průřezů konstrukce pouze z pevnostního hlediska. Stabilitní posudek únosnosti se tak stane více transparentní a jednodušší. Odpadá problematika mnohdy ne- snadného a nepřesného určení vzpěrných délek.

Pro vizuální znázornění výsledků pravděpodobnostní analýzy konstrukce je možné nechat vykreslit rozptyl účinků zatížení pomocí množiny bodů, tzv. „mraveniště“, odpovídajících kombinacím jednotlivých vstupních náhodně proměnných veličin. Výsledné rozptyly ohybových momentů, vnitřních sil a maximálních normálových napětí jsou znázorněny na obrázku 4. Za povšimnutí stojí především průběhy vnitřních sil a napětí na vnitřním kyvném sloupu, kde v důsledku analýzy podle teorie II. řádu a zavedení počátečních imperfekcí prutů jsou identifikovány nezanedbatelné hodnoty ohybových momentů ve střední části prutu.

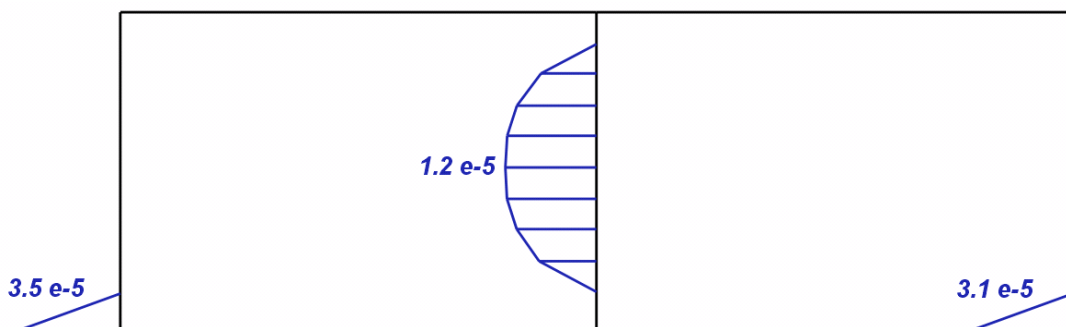


Obr. 4: Odezva konstrukce na zatížení.

Program MCD 1.2 umožňuje provedení výpočtu pravděpodobnosti poruchy v libovolném průřezu posuzované konstrukce. Toho lze využít pro vykreslení výsledků pomocí tzv. „křivek pravděpodobnosti poruchy“, viz [9]. Pomocí křivek pravděpodobnosti poruchy lze velmi jednoduše identifikovat místa v konstrukci, ve kterých hrozí zvýšené riziko překročení zavedeného mezního stavu. Statik tak získá přehled o úrovni spolehlivosti jednotlivých prvků konstrukce. Získaná data lze rovněž využít pro optimalizaci návrhu prvků konstrukce.

Pro posuzovanou rámovou konstrukci jsou křivky pravděpodobnosti poruchy znázorněny na obrázku 5 (křivky odpovídají analýze rámové konstrukce podle teorie II. řádu, provedeno bylo 5000000 simulací Monte-Carlo, porucha vztahena k překročení elastické únosnosti průřezu, výstup z programu MCD 1.2 byl upraven v grafickém editoru). Z průběhu křivek pravděpodobnosti poruchy vyplývá, že „kritickými“ místy posuzované konstrukce dolní části vnějších sloupů v místě vetknutí a prostřední část kyvného sloupu. Uvážíme-li za hodnotu návrhové pravděpodobnosti $P_d = 1 \cdot 10^{-4}$, pak všechny pruty posuzované konstrukce vyhoví z hlediska posuzovaného mezního stavu únosnosti.

Posudek použitelnosti rámové konstrukce je v řešeném příkladu vztažen k hodnotě tolerovatelné vodorovné deformace horních styčníků rámu $w_{lim} = H / 200$, kde H je výška rámu. Spočtená hodnota pravděpodobnosti poruchy pro 5000000 simulačních kroků je $P_f = 5,49 \cdot 10^{-2}$. Uvážíme-li za hodnotu návrhové pravděpodobnosti $P_d = 7 \cdot 10^{-2}$, pak rámová konstrukce vyhoví z hlediska posuzovaného mezního stavu použitelnosti.



Obr. 5: Křivky pravděpodobnosti poruchy pro posudek únosnosti.

4.3 Posudek spolehlivosti s uvážením vlivu koroze

V následující kapitole je naznačen možný postup vedoucí k vyhodnocení únosnosti a životnosti konstrukce vystavené účinkům koroze. Pro analýzu byl zvolen modelový případ, kdy dochází ke korozivnímu napadení spodní části nosných sloupů, vystavených nepříznivým atmosférickým vlivům, viz obrázek 6. Pro případ rámové konstrukce znázorněné na obrázku 3 se jedná o krajní sloupy 1 a 3.

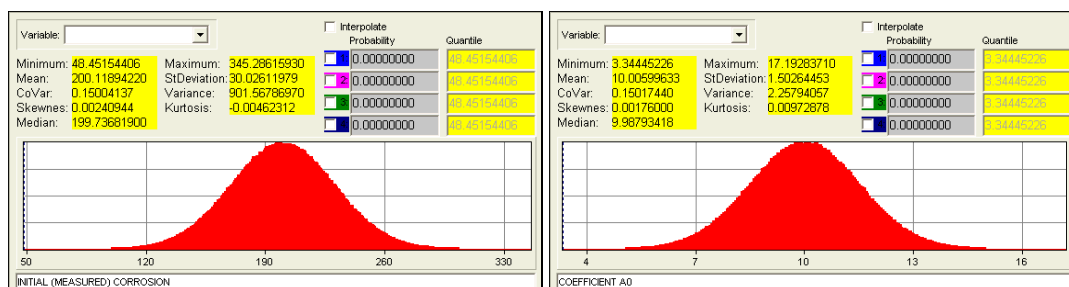


Obr. 6: Ilustrační příklady koroze spodních částí nosných sloupů.

Hlavní vstupní veličinou charakterizující degradační účinky koroze je hodnota počátečního oslabení průřezu korozí (pro případ „I“ profilu počáteční oslabení pásnic a stojiny). Tato vstupní veličina je nejčastěji stanovena na základě statistického zpracování a vyhodnocení výsledků měření. V řešeném příkladu je hodnota počátečního oslabení korozí zavedena normálním rozdělením $N(\mu = 200 \mu m; \nu = 15 \%)$, viz obr. 7.

Dolní části vnějších sloupů 1 a 3 lze v programu MCD 1.2 modelovat jako samostatné krátké prvky (v řešeném modelu jsou sloupy 1 a 3 tvořeny dvěma prvky o délkách 0,01 m a 3,99 m). Těmto krátkým prvkům je přiděleno počáteční oslabení pásnic a stojiny korozí v souladu s obrázkem 7. V programu MCD 1.2 bylo provedeno 5000000 simulací přímou metodou Monte-Carlo. Výsledná hod-

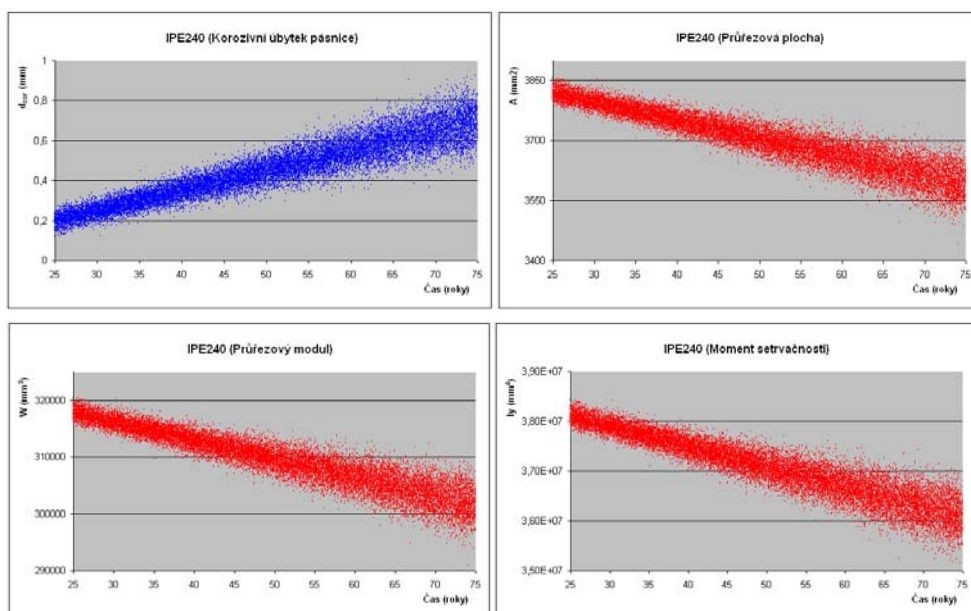
nota pravděpodobnosti poruchy pro pravý sloup, vztažená k překročení elastické únosnosti průřezu, je rovna $P_f = 6,1 \cdot 10^{-5}$. Hodnota spočtená bez zahrnutí vlivu koroze byla rovna $P_f = 3,1 \cdot 10^{-5}$, viz obrázek 5. Došlo tedy k nárůstu spočtené pravděpodobnosti poruchy, posuzovaný průřez přesto splní zavedené kritérium $P_f = 6,1 \cdot 10^{-5} < P_d = 1 \cdot 10^{-4}$ a vyhoví tak z hlediska mezního stavu únosnosti. Obdobný rozdíl ve spočtených hodnotách pravděpodobnosti poruchy lze vysledovat také u levého sloupu. Výsledná hodnota pravděpodobnosti poruchy pro levý sloup, vztažená k překročení elastické únosnosti průřezu, je rovna $P_f = 8,4 \cdot 10^{-5}$. Hodnota spočtená bez zahrnutí vlivu koroze byla u levého sloupu rovna $P_f = 3,5 \cdot 10^{-5}$, viz obrázek 5.



Obr. 7: Náhodně proměnné vstupní veličiny charakterizující účinky koroze (vlevo – počáteční naměřené oslabení korozí po 25 letech provozu konstrukce [μm]; vpravo – odvozená hodnota součinitele A_0 [$\mu\text{m} / \text{rok}$])

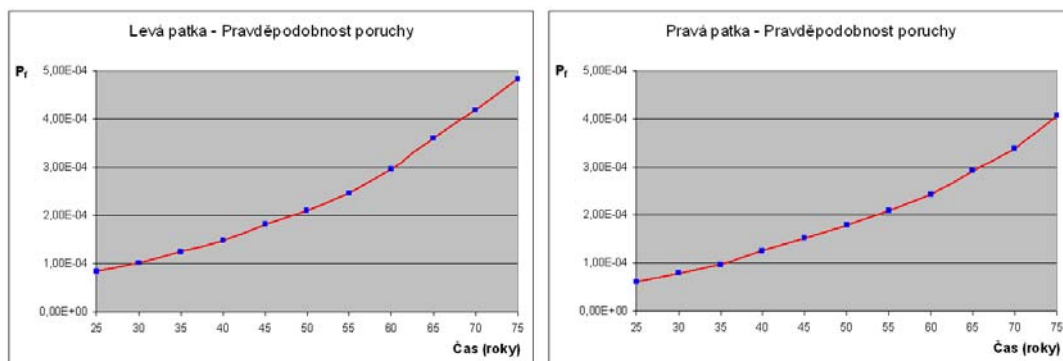
Získaná data o korozivním oslabení průřezů lze efektivně využít k odhadu zbytkové životnosti posuzované konstrukce. Za předpokladu, že korozivní oslabení dolních částí vnějších sloupů (viz obrázek 7 - vlevo) bylo naměřeno po 25 letech provozu konstrukce, na které nebyla prováděna oprava povrchové ochrany (předpokládá se, že původní povrchová ochrana fungovala cca 5 let, tj. dolní části sloupů byly vystaveny účinkům koroze po dobu cca 20 let), lze odhadnout průměrné roční oslabení pásnic a stojiny pomocí normálního rozdělení $N(\mu = 10 \mu\text{m}; \nu = 15 \%)$, viz obrázek 7 - vpravo. Za předpokladu lineárního nárůstu korozivního oslabení (koeficient A_1 ve vztahu /2/ je roven $A_1 = 1,0$) odpovídá výše uvedené normální rozdělení $N(\mu = 10 \mu\text{m}; \nu = 15 \%)$ přímo koeficientu A_0 ve vztahu /2/ (tento postup je konzervativní, neboť ustálená korozní rychlost po 20 letech je menší než korozní rychlost v prvních letech expozice).

Na obrázku 8 je vyjádřena časová závislost korozního úbytku d_{cor} pásnice či stojiny profilu IPE 240 posuzovaných krajních sloupů za předpokladu, že hodnota počátečního naměřeného korozivního oslabení a koeficient A_0 je reprezentovány výše uvedenými histogramy a koeficient $A_1 = 1$. Na obrázku 8 je rovněž znázorněna časová změna účinných průřezových charakteristik (průřezová plocha A , průřezový modul W_{el} a moment setrvačnosti I_y) pro průřez sloupu IPE 240 odpovídající naměřenému oslabení průřezů korozí po 25 letech provozu a výše uvedeným hodnotám koeficientů A_0 a A_1 .



Obr. 8: Korozivní úbytek a příslušné průřezové charakteristiky.

Odhadnuté hodnoty koeficientů A_0 a A_1 lze jednoduše zavést do programu MCD 1.2, který umožňuje následný výpočet pravděpodobnosti poruchy v libovolném časovém úseku životnosti konstrukce. Výsledná závislost pravděpodobnosti poruchy na čase pro pravý i levý vnější sloup posuzovaného portálového rámu je znázorněna na obrázku 9. Z výsledků znázorněných na obrázku 9 lze vysledovat nárůst spočtených hodnot pravděpodobnosti poruchy související se zvyšující se délkou časové expozice, po kterou je rám vystaven nepříznivým účinkům koroze. Poněkud vyšší hodnoty pravděpodobnosti poruchy u levého sloupu jsou způsobeny nesymetrickým zatěžovacím stavem konstrukce, kdy vodorovná síla P_l působí pouze v levém horním styčniku, viz obrázek 3. Uvážíme-li za hodnotu návrhové pravděpodobnosti $P_d = 1 \cdot 10^{-4}$, pak tato hodnota bude překročena po cca 5 letech (pro levý sloup) nebo po cca 10 letech (pro pravý sloup) od předchozí prohlídky konstrukce, při které byly pořízeny údaje o korozivním napadení konstrukce. Během tohoto období konstrukce vyhoví z hlediska mezního stavu únosnosti bez potřeby opravy nebo obnovy protikorozní ochrany či jiné rekonstrukce. Získaná data může správce objektu efektivně využít k časovému a finančnímu plánování potřebných investic.



Obr. 9: Závislost pravděpodobnosti poruchy na čase.

5 Závěr

Předkládaný příspěvek seznamuje čtenáře s možností využití pravděpodobnostních simulačních metod pro posudek únosnosti, použitelnosti a trvanlivosti ocelových konstrukcí vystavených nepříznivým účinkům koroze. Příspěvek se nezabývá do hloubky vlastní problematikou koroze oceli. Autor příspěvku si především kladl za cíl představit odborné veřejnosti „inženýrský“ přístup vedoucí k výstižnému zhodnocení spolehlivosti ocelových konstrukcí vystavených možným účinkům koroze. Navržený postup, který je pro snazší pochopení vysvětlen na modelovém příkladu, umožňuje rychlé a přehledné zhodnocení údajů o korozi potřebných k vyhodnocení spolehlivosti konstrukce. Tyto údaje získá statik nejčastěji na základě výsledků měření posuzované konstrukce, na základě zkušeností s provozem obdobných konstrukcí nebo z odborné literatury či norem. Navržený postup umožňuje nejen vyhodnocení spolehlivosti současného stavu konstrukce, ale také predikci její další životnosti.

Veličiny vstupující do posudku spolehlivosti jsou obecně náhodně proměnné. Rovněž data potřebná ke stanovení účinků koroze na konstrukci vykazují většinou nahodilý charakter. Jako příklad lze uvést statisticky zpracované výsledky měření korozivních úbytků materiálu a od nich odvozené hodnoty součinitelů A_0 a A_1 ve vztahu /2/. Nahodilý charakter lze přisoudit také odborným odhadům s určitým rozmezím hodnot, například předpokládané korozní rychlosti stanovené na základě zkušenosti s provozem obdobných konstrukcí nebo z rozsahů uvedených v odborné literatuře či normách, viz tabulky 1 a 2.

Postupy uvedené v příspěvku byly implementovány do softwarového produktu MCD 1.2, který slouží k vyhodnocování spolehlivosti ocelových rovinných prutových konstrukcí vystavených možným účinkům koroze. Je zapotřebí upozornit na skutečnost, že program MCD 1.2 není univerzálním komerčním statickým softwarem sloužícím k pravděpodobnostnímu vyhodnocování spolehlivosti ocelových konstrukcí. Důvodem pro vytvoření programu byla snaha vytvořit aplikaci, která může ukázat odborné veřejnosti využití pravděpodobnostních simulačních metod v oblasti posuzování ocelových konstrukcí vystavených účinkům koroze. Program MCD 1.2 je koncipován tak, aby svým uživatelským prostředím odpovídal běžným komerčním produktům. Procesy modelování konstrukce, zadávání náhodně proměnných veličin a následného vyhodnocení spolehlivosti jsou principiálně velmi jednoduché, transparentní a logické. Uživatel softwaru, tj. inženýr-statik, nemusí být specialistou v oblasti teorie pravděpodobnosti a statistiky.

Autor příspěvku se domnívá, že využití pravděpodobnostních simulačních metod pro vyhodnocení spolehlivosti ocelových konstrukcí vystavených korozi je z mnoha výše uvedených důvodů výhodné a může tak v budoucnu nalézt uplatnění v projekční praxi. K plnému nasazení těchto metod do projekční praxe však vede ještě dlouhá cesta. Jedním z hlavních důvodů je především poměrně malá obeznámenost a jistá nedůvěra odborné veřejnosti s možným využitím těchto metod. Ke změně tohoto stavu by měl přispět i tento příspěvek.

PODĚKOVÁNÍ

Projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Grantové agentury České republiky. Registrační číslo projektu je 103/07/0557.

LITERATURA

- [1] ZRŮNEK, M. (1981): Úprava povrchu kovových konstrukcí, SNTL, Praha, 1981.
- [2] FRANGOPOL D.M., ESTES, A.C. (1997): System reliability for Condition Evaluation of Bridges, In: Evaluation of Existing Steel and Composite Bridges, IABSE Workshop, Lausanne, 1997.
- [3] VIČAN, J, KOTEŠ, P. a SLAVÍK, J. (2001): Vliv koroze na spolehlivost ohýbaného prvku, In: II. ročník celostátní konference Spolehlivost konstrukcí, Dům techniky Ostrava, Ostrava, 2001, ISBN 80-02-01410-3.

- [4] ČSN ISO 9223 (1994): Koroze kovů a slitin - Korozní agresivita atmosfér - Klasifikace, ČNI, Praha, 1994.
- [5] ČSN ISO 9224 (1994): Koroze kovů a slitin - Korozní agresivita atmosfér - Směrné hodnoty pro stupně korozní agresivity, ČNI, Praha, 1994.
- [6] ČSN EN 12500 (2000): Ochrana kovových materiálů proti korozi - Pravděpodobnost koroze v atmosférickém prostředí - Klasifikace, stanovení a odhad korozní agresivity atmosférického prostředí, ČNI, Praha, 2000.
- [7] ČSN ISO 9225 (1994): Koroze kovů a slitin - Korozní agresivita atmosfér - Měření znečištění, ČNI, Praha, 1994.
- [8] ČSN ISO 9226 (1994): Koroze kovů a slitin - Korozní agresivita atmosfér - Stanovení korozní rychlosti standardních vzorků pro určení korozní agresivity, ČNI, Praha, 1994.
- [9] KŘIVÝ, V. und MAREK, P. (2007): Zur probabilistischen Bemessung von Stahlrahmen, Stahlbau, r. 76, č. 1, str. 12 -20, ISSN 0038-9154.
- [10] MAREK, P., GUŠTAR, M. and ANAGNOS, T (1996): Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers. Boca Raton : CCR Press, FL, USA, 1996. ISBN 0-8493-8286-6.
- [11] MAREK, P., BROZZETTI, J., GUŠTAR, M. and TIKALSKY, P. (2003) Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Method. Basics, Exercises, Software, 2nd Ed. Prague : ITAM CAS CR, 2003. ISBN 80-86246-19-1.
- [12] ROZLÍVKA, L a FAJKUS, M. (2003): Reálné pevnostní hodnoty konstrukčních ocelí a rozměrové úchytky válcovaných materiálů pro pravděpodobnostní posuzování spolehlivosti ocelových nosných prvků a konstrukcí metodou SBRA. In: IV. ročník celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, Dům techniky Ostrava, Ostrava, 2003. ISBN 80-02-01551-7.
- [13] Eurokód 3 (ČSN EN 1993-1-1) (2006): Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Praha : ČNI, 2006.
- [14] BS 5950 (2000): Structural Use of Steel in Building, Part 1, British Standards Institution, 2000.
- [15] PUSTKA, D., KŘIVÝ, V., VÁCLAVEK, L. and MAREK, P. (2006): Selected Structural Stability Problems Using SBRA Method. In Proceedings of the IABSE Symposium 2006 – Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering. IABSE Hungarian Group, Budapest, Hungary, 2006. ISBN 3-85748-114-5.
- [16] CHAN, S.L. (2007): Direct Analysis of Steel Structures Allowing for Imperfections and without Assumption of Effective Length, In: Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Steel Structures ICASS 2007, Research Publishing, Singapore, 2007. ISBN 978-981-05-9366-7.

Oponentní posudek vypracoval: Ing. Alexandr Kašný

